
 論 文

製鋼におけるスクラップ溶解速度に関する研究*

森 一美**・野村宏之***

Study on the Rate of Scrap Melting in the Steelmaking Process

Kazumi MORI and Hiroyuki NOMURA

Synopsis:

A mathematical model has been developed for scrap melting in the steelmaking process based on the concept of simultaneous heat and mass transfer. Steady state equations are established for heat and mass transfer in the boundary layer between solid and liquid. Heat conduction in the solid is expressed by an unsteady state equation. The thickness of diffusion layer and the thickness of scrap are chosen as the required parameters for the calculation. Numerical solutions are obtained by the finite difference method.

The calculation using the values of diffusion layer thickness ($5 \times 10^{-3} \sim 10^{-2}$ cm) found by the authors indicates that the present model gives a general agreement with practical data in the case of simple form of scrap.

It is predicted that scrap form and size have an effect on the rate-determining mechanism of scrap melting and on the duration of transient heat conduction in the solid scrap. This is considered to be important in the performance of dynamic control.

It is thought that at the beginning of the process when the temperature of the bath is low and the bath turbulence is weak, iron would solidify on the cold scrap.

A limit of size of scrap for the rapid refining are also discussed.

(Received Oct. 14, 1968)

1. 緒 言

製鋼においてスクラップは重要な鉄源であり、また鋼浴温度を適切に制御するために必要な冷却剤として用いられる。したがって精錬過程におけるスクラップの溶解挙動は鋼浴温度に対して大きな影響をもつが、このほか炉内精錬反応、スラグの生成、鋼浴の流動状況などにも影響を及ぼすものと考えられる。

このようにスクラップの溶解挙動の解明は実際的に非常に重要な問題であるが、現象が複雑であるために、従来製鋼炉内におけるスクラップの溶解に関する理論的な研究はほとんどなされていない。本研究ではとくにLD転炉製鋼におけるスクラップの溶解に対象をおき、その溶解機構を明らかにするために、スクラップ溶解速度と未溶解スクラップ中の温度分布を表わす数式モデルを与えた。さらに数式モデルにもとづいてスクラップの溶解速度と各種要因との関係を考察した。

2. 従 来 の 研 究

スクラップの溶解に関する従来の研究としては、実際の製鋼炉内におけるスクラップの溶解速度を測定したり、あるいは実験室できわめて単純化された系で取り扱われているものが大部分である。

V. I. LAPITSKII ら¹⁾は平炉におけるスクラップの溶解速度を放射性同位元素 Ru^{103} を用いて測定し、鋼浴本体とスクラップ表面の炭素濃度の差を考えると溶解速度をよく説明できると述べている。

宮川ら²⁾や二上ら³⁾は同様に放射性同位元素を用いてLD転炉におけるスクラップの溶解速度を測定した。とくに二上らはスクラップの板厚と溶解速度の関係を調べ

* 昭和42年10月、43年4月本会講演大会にて発表
昭和43年10月14日受付

** 名古屋大学工学部 工博

*** 名古屋大学工学部

ているが、定量的な解析を行なうまでにいたっていない。

R. D. PEHLKE ら⁴⁾, R. G. OLSSON ら⁵⁾および小坂ら⁶⁾は実験室的に鋼円柱の熔融 Fe-C 合金中への溶解を行ない、液側境界層中の Fe と C の相互拡散により実験結果を説明している。この解析は製鋼スクラップのように鋼浴とスクラップの間が熱的に非定常である場合には適用できない。

また R. JESCHAR ら⁷⁾はスクラップの溶解を熱移動にもとづくモデルにより解析した。このモデルはスクラップが純粋に熱移動のプロセスのみにより溶解する場合に適用できるものであり、LD 転炉などにおけるように高炭素濃度の浴中にスクラップが溶解してゆく場合には、物質移動も含む溶解機構を考えなければならない。

製鋼におけるスクラップの溶解は実際には熱と物質の同時移動により進行するものである。しかし、以上の文献レビューでわかるように、従来この立場で問題を扱った研究はない。そこで本研究においては、熱と物質の同時移動をふくむ溶解機構にもとづく数式モデルを与えた。

3. 解析方法

鋼浴内でスクラップが溶解するプロセスはつぎのように考えられる。

鋼浴からスクラップに与えられる熱はスクラップの温度上昇とスクラップの溶解に必要な熱とに使われる。また物質移動の面からみると、溶解したスクラップの Fe が浴本体に拡散してゆき、逆に C が浴本体からスクラップ表面に移動し、表面の溶融点は低くなり、スクラップは溶解してゆく。

本研究においてはスクラップを純鉄として考え、溶解プロセスを 2 段階にわけ、スクラップ表面が溶融点に達するまでを予熱期、それ以後溶解が進行する時期を溶解期とする。すなわち Fig. 1 の Fe-C 系状態図においてスクラップ表面が、浴 C 濃度と対応する液相線上の温度 (a 点) に達するとスクラップは溶解し始めるものとする。一般に溶解が進行しているとき、浴の温度、組成が b 点に対応するときのスクラップ表面の温度、組成は c 点で示される。

いま平板状スクラップをとり、溶解プロセスを一次元的に考えると、予熱期および溶解期について以下のような基礎方程式と条件が考えられる。Fig. 2 にそのモデル図を示した。

1) 予熱期

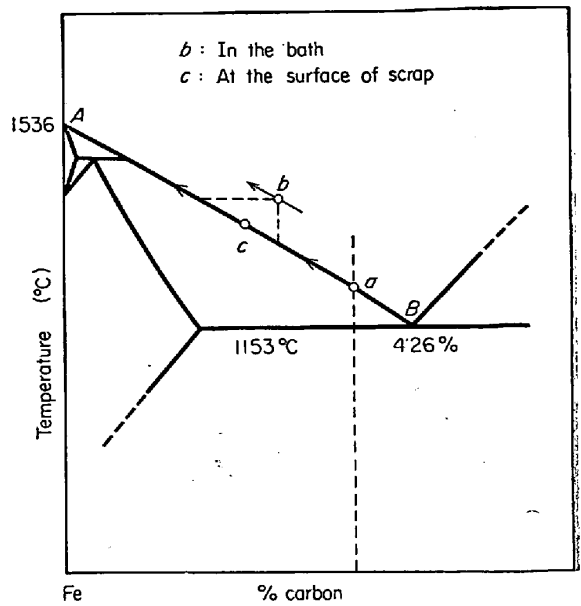


Fig. 1. Fe-C phase diagram.

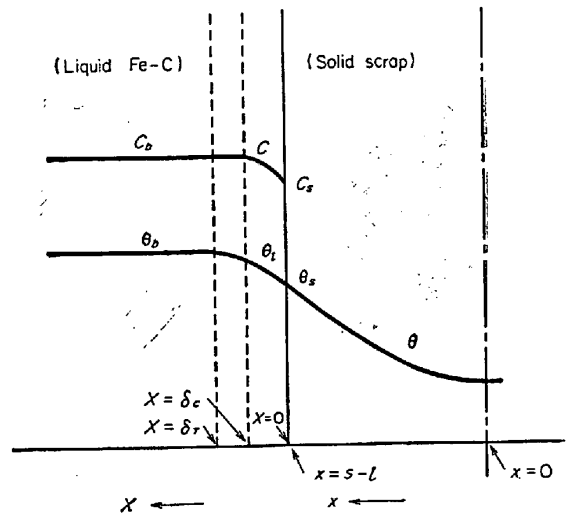


Fig. 2. Temperature and concentration profile for the mathematical analysis of scrap melting.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$x=0; \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad t=0; \theta = \theta_0 \dots\dots\dots (2), (3)$$

$$x=s; h_c(\theta_b - \theta_s) = k_s \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \dots\dots\dots (4)$$

2) 溶解期

$$\text{スクラップ側} \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{鋼浴側} \quad D \frac{d^2 C}{dX^2} - \frac{dl}{dt} \frac{dC}{dX} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

$$\alpha_1 \frac{d^2 \theta_1}{dX^2} - \frac{dl}{dt} \frac{d\theta_1}{dX} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

(5)式に対する条件

$$x = 0; \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad t = t_m; \theta = \theta(x) \dots (8), (9)$$

$$x = s-l; \theta = \theta_{m.p.}(t) = \theta_s(t) \dots (10)$$

(6)式に対する条件

$$X = \delta_c; C = C_b \quad X = 0; C = C_s(t) \dots (11), (12)$$

ここで(10)式と(12)式の θ_s と C_s に対しては、

$$\theta_s = f(C_s) \dots \text{状態図の液相線} \dots (13)$$

の関係がある。ここで

$$f(C_s) = -8 \cdot 13 C_s^2 - 54 \cdot 0 C_s + 1536$$

として近似する。

(7)式に対する条件

$$X = \delta_T; \theta_l = \theta_b \quad X = 0; \theta_l = \theta_{m.p.} = \theta_s \dots (14), (15)$$

界面での mass flux の関係は

$$D \left(\frac{dC}{dX} \right)_{X=0} = \frac{dl}{dt} (C_s - C_o) \approx \frac{dl}{dt} C_s \dots (16)$$

界面での heat flux の関係は

$$k_i \left(\frac{d\theta_l}{dX} \right)_{X=0} = q \rho_s \frac{dl}{dt} + k_s \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x=s-l} \dots (17)$$

また、予熱期と溶解期をとおして

$$\theta_b = \xi(t), \quad C_b = \eta(t) \dots (18), (19)$$

のような精錬曲線を考える。

以上記した(1)式から(19)式を用いて電子計算機により解析し、各時間におけるスクラップ内の温度分布、溶解厚さ、溶解速度を求めることができる。

以上は平板状スクラップの場合であるが、実際には溶解に伴って、スクラップの界面積が変化するなど複雑である。そこで、つぎに溶解界面積が変化する場合について円柱状スクラップを考え、平板状スクラップの溶解と比較検討する。数式モデルの考え方は平板状スクラップの場合と同じであるが、座標系は円柱座標をとる。基礎式はつぎのようになる。

1) 予熱期

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha_s \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \dots (1')$$

2) 溶解期

$$\text{スクラップ側} \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha_s \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \dots (5')$$

$$\text{鋼浴側} \quad D \frac{d^2 C}{dX^2} - \frac{dl}{dt} \frac{dC}{dX} = 0 \dots (6')$$

$$\alpha_l \frac{d^2 \theta_l}{dX^2} - \frac{dl}{dt} \frac{d\theta_l}{dX} = 0 \dots (7')$$

条件は前述の平板状スクラップの場合と同じものであり、距離 x を r に変えたものである。

実際の場合に、比較的低い温度のスクラップの存在しているところに溶銑を装入すると、溶銑がスクラップ表

面で凝固、付着する可能性もある。この現象はスクラップにより溶銑の熱が急速に奪われることにより生ずるものと考えられる。この問題は上述の数式モデルの妥当性とも関連するので、伝熱の面から解析してみる。平板状スクラップの場合に対して基礎式および条件は次のようになる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \dots (20)$$

$$x = 0; \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad t = 0; \theta = \theta_0 \dots (21), (22)$$

$$x = s+h(t); \theta = \theta_{sf} \dots (23)$$

$$x = s+h(t); h_e(\theta_b - \theta_{sf}) + q \rho_s \frac{dh}{dt} = k_s \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \dots (24)$$

Fig. 3 にそのモデル図を示した。ここで凝固してスクラップ表面に付着した Fe-C 層とスクラップの熱伝導率は近似的に等しいとした。

以上の数式モデルで δ_c , δ_T , h_e の値がパラメータとして残っている。これについてはわぎのような取り扱いをした。すなわち、平板上を熔融金属などの流体が流れる場合の熱移動、物質移動に対して、つぎのような無次元相関式が与えられている^{8)~10)}。

$$\text{層流に対して} \quad Sh = 0.664 Re^{0.5} Sc^{1/3} \dots (25)$$

$$Nu = 0.664 Re^{0.5} Pr^{1/3} \dots (26)$$

$$\text{乱流に対して} \quad Sh = 0.036 Re^{0.8} Sc^{1/3} \dots (25')$$

$$Nu = 0.036 Re^{0.8} Pr^{1/3} \dots (26')$$

これらの式から層流、乱流ともに、

$$\delta_T / \delta_c = (\alpha_l / D)^{1/3} \dots (27)$$

が求められる。また

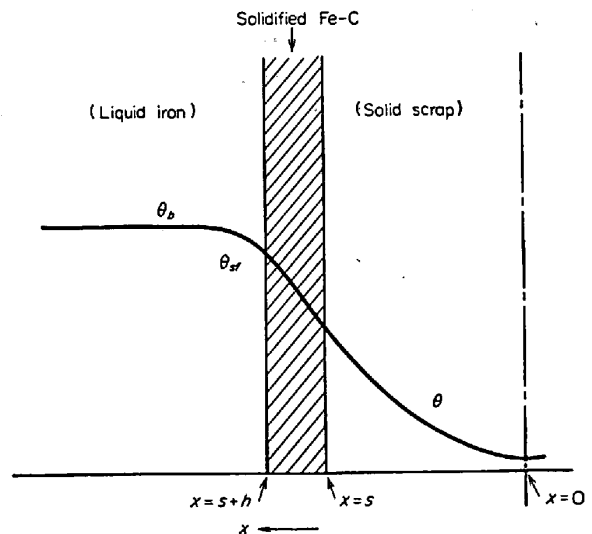


Fig. 3. Temperature profile for the mathematical analysis of solidification of liquid iron over the scrap.

$$h_e = k_l / \delta T \dots\dots\dots (28)$$

であるから、結局 δ_c をパラメータとして与えれば δT , h_e を推定することができる。

4. 数式モデルの解析および考察

実際の製鋼においては流動状況の複雑さなどにより、 δ_c の時間的变化を定量的に評価することは困難である。最近それが試みられた例¹¹⁾はあるが、まだ検討の余地が残されている。したがってここでは著者ら¹²⁾が基礎実験で求めた $\delta_c = 5 \times 10^{-3} \sim 10^{-2}$ cm の値をもとにして、 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ cm の範囲で δ_c をパラメータとして選び、吹錬中 δ_c は一定とした。また物性値は温度変化を無視し、以下のように与えた。

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 5.68 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}^{13)} & q &= 66 \text{ cal/g} \\ \alpha_l &= 1.135 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{sec}^{13)} & \rho_s &= 7 \text{ g/cm}^3 \\ k_s &= 4.13 \times 10^{-2} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{°C}^{13)} \\ D &= 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec} \\ k_l &= 8.27 \times 10^{-2} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{°C}^{13)} \end{aligned}$$

数式モデルを計算するプログラムの構成を Fig. 4 に

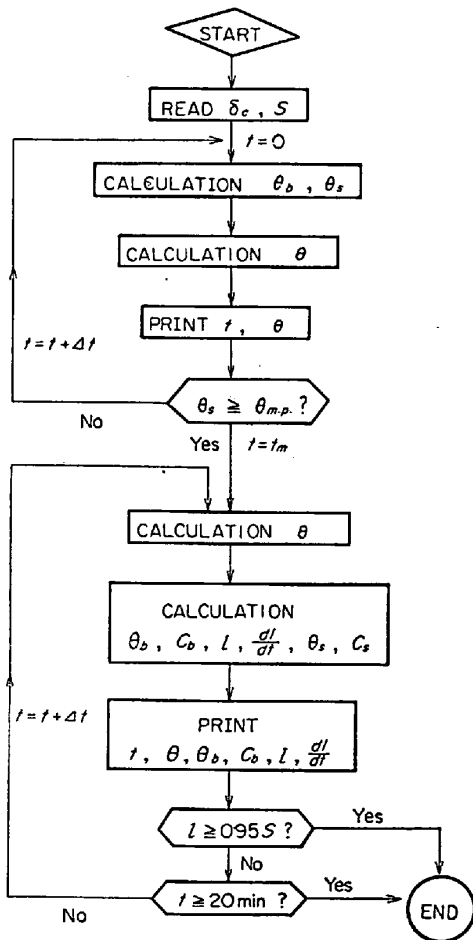


Fig. 4. Flow diagram of computer calculation for the scrap melting model.

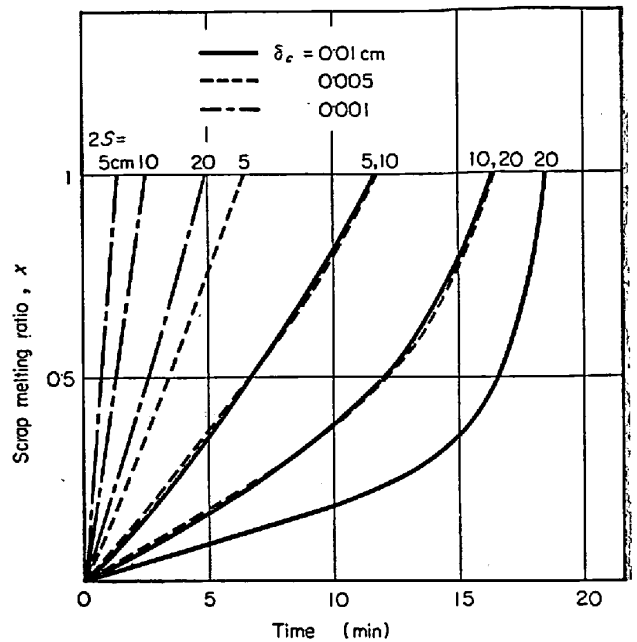


Fig. 5. Typical relations between scrap melting ratio and time.

示す。

4.1 平板状スクラップの溶解

いま 20 min 吹錬の場合を考え、鋼浴温度を $\theta_b = 0.25t + 1300$ (1300→1600°C), 鋼浴炭素濃度を $C_b = -0.0035t + 4.2$ (4.2→0% C) というように時間に対して一次的に変化してゆく場合について考える。炉内へのスクラップの装入温度 θ_0 を 0°C とし、 $\delta_c = 10^{-3}, 5 \times 10^{-3}, 10^{-2}$ cm の各場合についての溶解率の時間的变化を Fig. 5 に示す。

δ_c の値の大きさによりかなり溶解時間が異なることがわかる。また計算の結果によれば、ここで選んだ δ_c の値では予熱期はきわめて短く、ただちに溶解が始まることが推定された。図に示されるように、およそ 16 min 以後で溶解率の上昇が著しいのは、浴温度がこのころからスクラップ自身の融点 (純鉄の融点 1536°C) 以上となり、鋼浴からスクラップへの供給熱が急激に増大するからであると考えられる。

二上ら³⁾の測定結果によれば厚さが 15 cm の平板状スクラップはほぼ 16~20 min で溶解している。本研究においても $\delta_c = 5 \times 10^{-3} \sim 10^{-2}$ cm の場合に Fig. 5 から推定すると、15 cm の厚さのスクラップの溶解は 14~17.5 min くらいで終了することが示されている。このように本数式モデルは、スクラップの形状が簡単な場合には、実際とかなりよく一致することがわかる。

つぎに鋼浴温度と炭素濃度のより実際の変化を想定し、Fig. 6 (a) のような変化を数式モデルに導入した。一例として $\delta_c = 5 \times 10^{-3}$ cm を選び、 θ_b と C_b が時間に対

して直線的に変化する場合と比較して Fig. 6 (b) に示す。両者は異なった溶解挙動を示しており、同じ精錬時間でもスクラップの溶解プロセスは精錬途中の状態によ

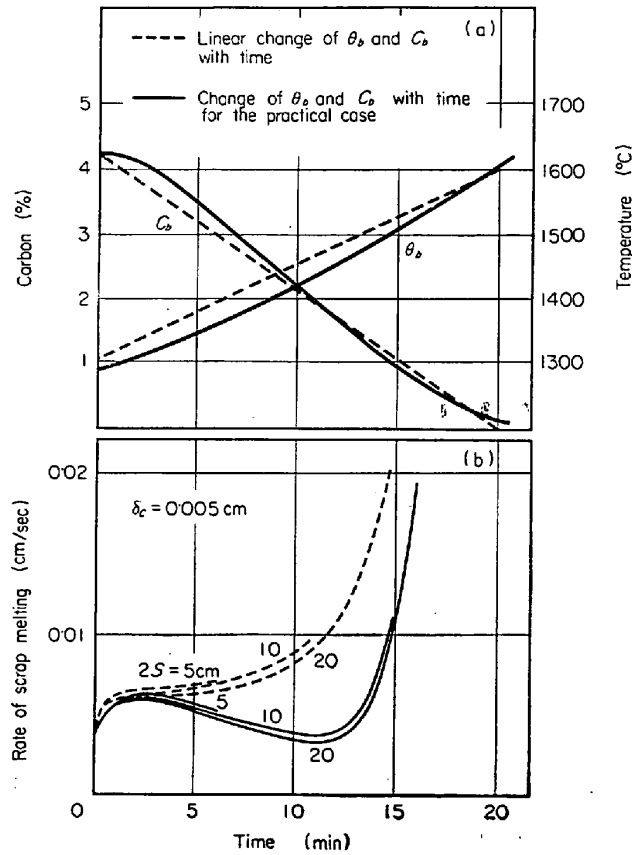


Fig. 6. Comparison of rate of scrap melting between two types of refining.

つてかなり影響を受けるものと考えられる。

つぎに θ_s と C_s が直線的に変化する場合での溶解に伴う未溶解スクラップ中の温度分布と溶解界面の位置を Fig. 7 に示す。板厚が小さい場合たとえば $2S = 5$ cm では、約 1/3 の厚さの溶解以後は未溶解の板内の温度はほぼ一定で溶解が進行してゆく。これに対して板厚が大きくなると、溶解が完了するちかくまで熱的に非定常のまま溶解する。これに関連して Fig. 8 に板厚 $2S = 20$ cm の場合のスクラップ表面温度 (θ_s) とスクラップ中心部の温度 (θ_c) の時間的变化を示す。

Fig. 7, Fig. 8 からわかることは、板厚の大きいスクラップの場合、吹錬中かなりの時期にわたって鋼浴からスクラップへ流入する熱が存在することである。このことは、吹錬の dynamic control を考える場合に重要な意味をもつものと考えられる。

つぎに最近吹錬時間が短くなりつつあることを考えると、短い吹錬時間内でどれほどの大きさのスクラップを溶解しうるかということが実際的にも興味ある問題となってくる。このいわゆる急速吹錬の場合を想定し、溶解可能な板厚の限界値を数式モデルにより推定しようと試みた。吹錬時間を 20 min から 15 min, 10 min, 5 min とし、各時間内で浴 C% が 4.2~0%, 浴温度が 1300~1600°C と直線的に変化してゆく場合を考えた。その解析結果を Fig. 9 に示す。これで示されるよりも板厚の大きいスクラップを装入した場合に未溶解として吹錬末期に残ることが解析的に示された。実際には鋼浴温度とスクラップの溶解挙動は互いに影響しあつて変化してゆ

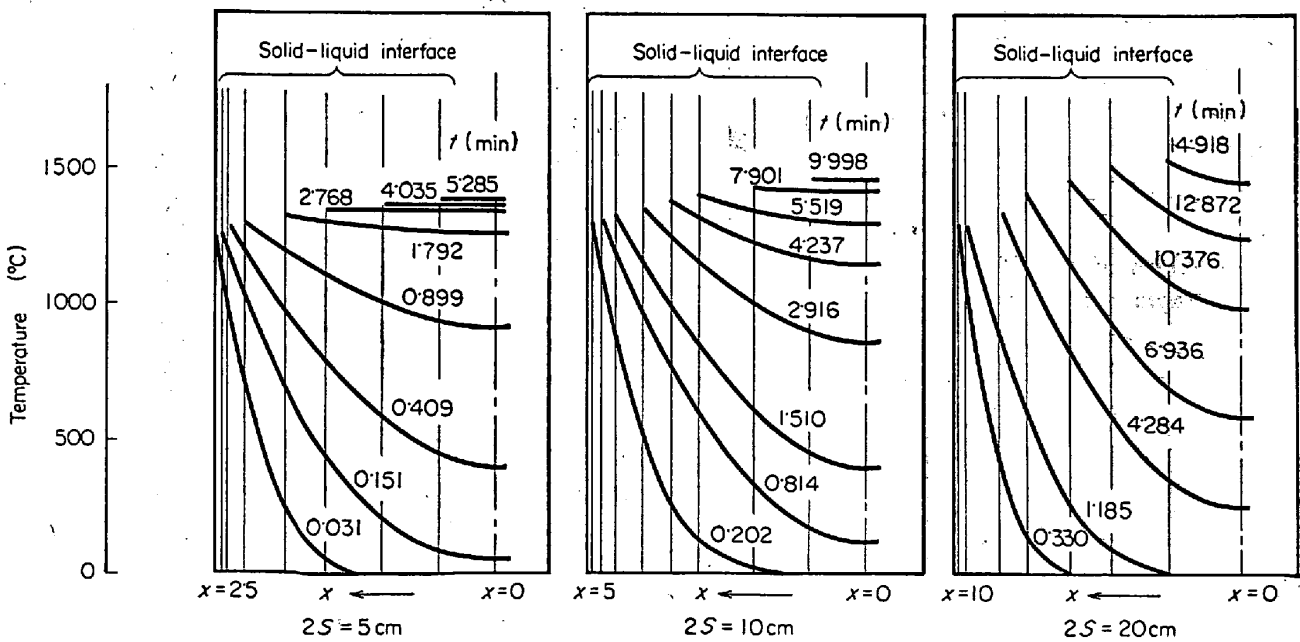


Fig. 7. Temperature distribution and solid-liquid interface during melting of plate scrap ($\delta_c = 0.0005$ cm).

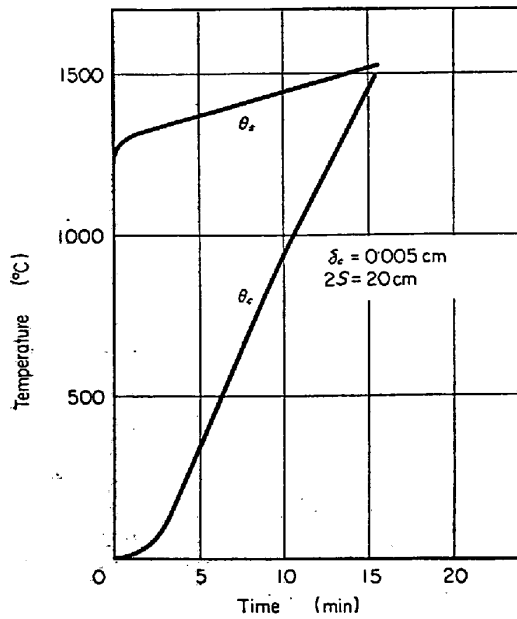
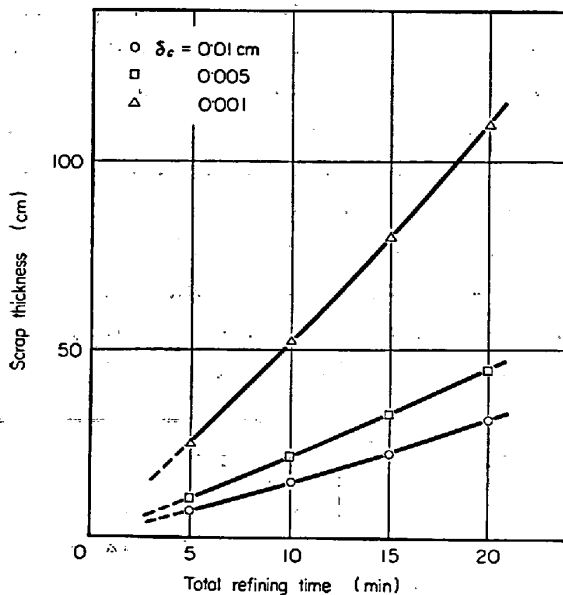
Fig. 8. Variation of θ_s and θ_c with time.

Fig. 9. Limit of scrap thickness in the case of rapid refining process.

くものであり、本解析のように一方的に鋼浴温度変化を与えて解析するのは問題ではあるが、吹錬終了時での未溶解スクラップの問題を論ずる場合に、装入スクラップの板厚の重要性をかなり定量的に示していると考えられる。

4.2 円柱状スクラップの溶解

いま 20 min 吹錬の場合で、浴 C が 4.2~0%，浴温度が 1300~1600°C と時間に対して直線的に変化してゆく場合の溶解挙動の解析を Fig. 10 に示す。図において dl/dt は半径方向の溶解速度であり、 dx/dt は溶解率の時

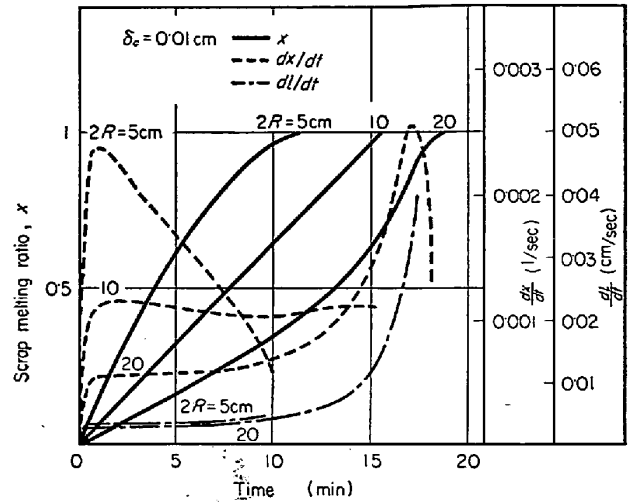


Fig. 10. Typical calculation of melting of cylindrical scrap.

間変化である。両者の傾向が明確に異なっていることは、界面積が一定である平板状スクラップの溶解にみられないことである。すなわち円柱状スクラップでは界面積が時間的に減少してゆくために、溶解速度 dl/dt が大きくなってゆく場合でも溶解率の時間的変化 dx/dt は増加したり、減少したりすることがあると考えられる。

つぎに円柱状スクラップの溶解に伴う未溶解スクラップ中の温度分布と溶解界面の位置を Fig. 11 に示す。Fig. 7 に示す平板状スクラップの場合と比較して注目されるのは、円柱状スクラップの場合のほうが内部の温度の上昇がはやいということである。このことは円柱状スクラップの場合には、スクラップ内部への heat flux が中心に近づくほど増大するためであると考えられる。

4.3 溶鉄のスクラップ表面への凝固、付着の問題

ここでは溶鉄本体の温度 θ_b は変化しないものとし、また溶鉄の C% も一定とすることにより、溶鉄の凝固温度 θ_{sf} を一定とした。いま 4.2% C の溶鉄を考えると、凝固温度は $\theta_{sf} = 1166^\circ\text{C}$ である。また凝固付着した層とスクラップは連続しているものとした。Fig. 12 に $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$ 、 $\theta_b = 1250, 1300, 1350^\circ\text{C}$ の 3 つの場合の凝固付着層の厚さと時間の関係を示す。浴の伝熱係数 h_e 、浴温度 θ_b によりかなり異なつた挙動が推定される。また (28) 式から、前項で用いた $\delta_c = 10^{-3} \sim 10^{-2} \text{cm}$ に対応する h_e は $0.8 \sim 8.0 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec}^\circ\text{C}$ となるが、この範囲の h_e を用いると、ほとんど凝固付着する傾向はみられないか、または非常に短い時間に限られることが推定された。前項までの $\delta_c = 10^{-3} \sim 10^{-2} \text{cm}$ の範囲での解析においては付着の問題を無視したが、これは妥当なものであることがわかる。

吹錬初期には、とくにスクラップ周辺の浴の流動状況

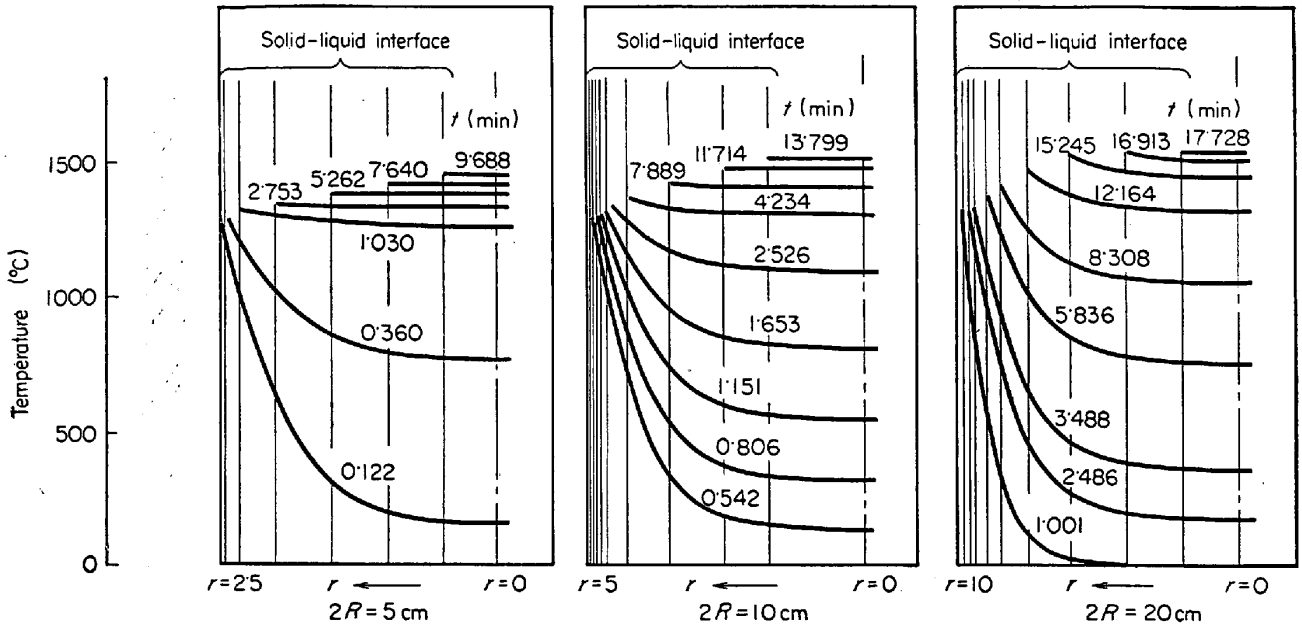


Fig. 11. Temperature distribution and solid-liquid interface during melting of cylindrical scrap ($\delta_c = 0.01$ cm).

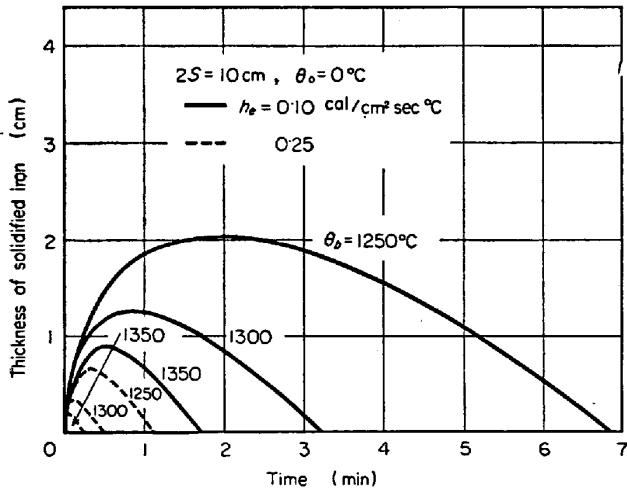


Fig. 12. Solidification of iron on cold scrap.

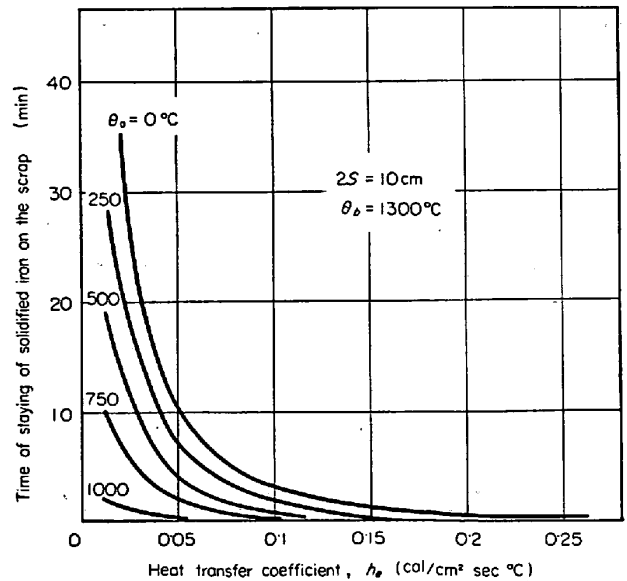


Fig. 13. Effects of θ_0 and h_b on the time of staying of solidified iron on the scrap.

は弱いものと想像され、 δ_c は大きく、したがって h_e は小さな値となっていると考えられるので、凝固付着する可能性が十分にある。とくにスクラップとスクラップの間隙に浸入した溶鉄はそこで固まってしまうのではないかと考えられる。

つぎにスクラップを予熱した場合を考えてみる。すなわち初期装入温度 θ_0 を 250, 500, 750, 1000°C と変えた場合の凝固付着時間と諸因子との関係を、板厚 $2S = 10$ cm の場合について Fig. 13 に示す。予熱温度 θ_0 およびスクラップ周辺の浴の流動状況 h_b がともに強い影響を及ぼすことがわかる。

4.4 スクラップの溶解プロセスの律速段階について

ここではスクラップの溶解プロセスにおいて、熱移動

と物質移動が全体の溶解速度にどのような役割をもつか考察してみる。

$\delta_c = 0.005$ cm, $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$ で、 C_b と θ_b が時間に対して直線的に変化してゆく場合について考える。板厚 $2S = 1, 10, 20$ cm の各場合に対して、熱と物質の同時移動で解析した溶解速度 (v_1) と、溶解が物質移動のみにより支配されると仮定して計算した溶解速度 (v_2) から、各板厚について v_1/v_2 を算出し、Fig. 14 に示す。板厚の小さいものは 1 に近く、物質移動が支配的であるが、板厚が大きくなるにつれてその比が小さくなり、しだい

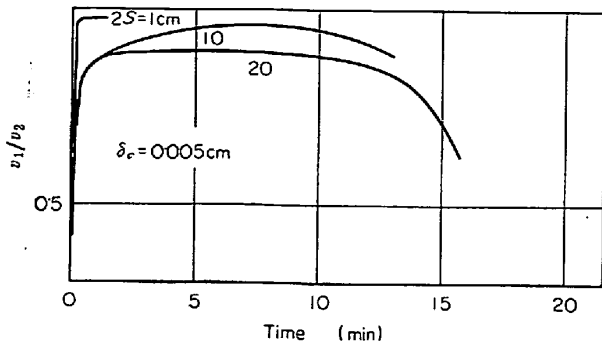


Fig. 14. Variation of v_1/v_2 with time.

に熱移動の占める役割が大きくなっていくことが示される。さらに時間的にみると、精錬初期のスラップ自身の温度が低い場合、および後期の浴炭素濃度が低くなった場合に、精錬中期に比べて熱移動の役割が大きいことが示されている。

5. 結 論

製鋼、とくにLD転炉を対象としたスラップの溶解機構に対して熱と物質の同時移動を含む数式モデルを与え、つぎのような結果を得た。

(1) 実験から推定した $\delta_c (5 \times 10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ cm})$ の値を用いると、本研究のモデルはスラップの形状が簡単な場合には、実際とかなりよく合うことがわかった。

(2) 精錬途中の鋼浴温度、浴C%はスラップの溶解プロセスにかなり影響を及ぼすことが推定される。

(3) 板厚の大きいスラップは精錬末期まで熱的に非定常であり、精錬の dynamic control を考える場合に問題となると考えられる。

(4) 急速吹錬の際に装入可能なスラップ厚さの限界について考察した。

(5) 円柱状スラップの場合、未溶解スラップ中の温度分布や溶解率の時間変化は平板状スラップとはかなり異なつたようすを示す。

(6) 溶鉄温度が低い場合やスラップ周辺の浴の流動状況が弱い場合に溶鉄がスラップ表面に凝固付着する可能性がある。

(7) 板厚が小さいスラップの溶解はほとんど物質移動律速であり、板厚が大きくなるにつれて熱と物質の同時移動が問題となる。

なお、本研究における数式モデルは、実際の精錬に対してそのまま適用することはできないが、実際の問題を検討する場合の基礎的指針を与えるものと考えられる。

本研究を遂行するにあたり、有益なるご助言を賜つた日本原子力研究所中山隆氏、名古屋大学工学部化学工学科松原正一教授および清水賢講師に感謝いたします。

なお本研究の計算においては東京大学大型計算機センターの HITAC 5020 を使用した。

記 号

- t : 時間 (sec)
- t_m : スラップ溶解期開始時間 (sec)
- x : 平板状スラップの板中心軸からの距離 (cm)
- S : 平板状スラップの初期厚さの 1/2 (cm)
- l : スラップ溶解厚さ (cm)
- h : 溶鉄の凝固厚さ (cm)
- r : 円柱状スラップの中心軸からの距離 (cm)
- R : 円柱状スラップの初期半径 (cm)
- θ : スラップ内温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- θ_b : 鋼浴本体温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- θ_s : スラップ表面温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- $\theta_{m.p.}$: スラップ表面熔融温度 ($^{\circ}\text{C}$)
(溶解期においては $\theta_s = \theta_{m.p.}$)
- θ_0 : スラップ初期温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- θ_c : スラップ中心軸温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- θ_{sf} : 溶鉄の凝固温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- θ_l : 鋼浴側温度境界層内の温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- C : 鋼浴側濃度境界層内の炭素濃度 (%)
- C_b : 鋼浴本体炭素濃度 (%)
- C_s : スラップ表面炭素濃度 (%)
- C_0 : スラップ中炭素濃度 (%)
- δ_c : 濃度境界層厚さ (cm)
- δ_T : 温度境界層厚さ (cm)
- D : Fe-C 液系相互拡散係数 (cm^2/sec)
- α_l : 鋼浴側熱拡散率 (cm^2/sec)
- h_e : 鋼浴側伝熱係数 ($\text{cal}/\text{cm}^2\text{sec}^{\circ}\text{C}$)
- k_l : 鋼浴側熱伝導度 ($\text{cal}/\text{cm sec}^{\circ}\text{C}$)
- ρ_s : スラップ密度 (g/cm^3)
- q : スラップ溶解熱 (cal/g)
- Re, Sh, Nu, Sc, Pr : レイノルズ数, シャーウッド数, ヌッセルト数, シュミット数, プラントル数 (-)

文 献

- 1) V. I. LAPITSKII, et al.: Stal, (1966), Jan., p. 23
- 2) 宮川, 他: 鉄と鋼, 51(1965), p. 1925
- 3) 二上, 他: 鉄と鋼, 53(1967), p. 122
- 4) R. D. PEHLKE, et al.: Trans. Met. Soc. AIME, 233(1965), p. 1420
- 5) R. G. OLSSON, et al.: Trans. Met. Soc. AIME, 233(1965), p. 1654
- 6) 小坂, 蓑輪: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 1429
- 7) R. JESCHAR and E. MILLIES: Arch. Eisenhüttenw., 37 (1966), p. 283
- 8) 平田: 化学工学, 26 (1962), p. 709
- 9) 甲藤: 伝熱概論 (1964), p. 65 [養賢堂]
- 10) 藤本, 佐藤: 伝熱工学 (1967), p. 28, 34 [共立出版]
- 11) 一戸, 他: 日本鉄鋼協会九州支部大会講演, (昭和42年10月)
- 12) 野村, 森: 鉄と鋼, 54 (1968), p. S420
- 13) J. H. LUDLEY, and J. SZEKELY: J. Iron Steel Inst., (1966), Jan., p. 12